干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

苏宏图戈壁沉积物分形空间变异性及其成因

刘茜雅[1,2]， 王海兵[1,2]， 左合君[1,2]， 肖建华[3]

（1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院，内蒙古 呼和浩特 010019；2. 内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010019；3. 中国科学院西北生态环境资源研究院，甘肃 兰州 730000）

摘　要： 戈壁沉积物组分结构具有分形特征，能否利用分形特征及其变异性指示戈壁地表沉积物形成过程中的风沙作用目前认识不足。通过计算内蒙古苏宏图戈壁地表表层沉积物的分形维数值并分析了其空间变异性。结果表明：沉积物分形维数值随0.050~0.179 mm跃移组分含量的增大而增大，随0.179~20.919 mm蠕移及风蚀残余组分含量的增大而减小。风为塑造戈壁地貌的主导因素，戈壁沉积物分形值小于冲积、洪积作用下的泥石流沉积物（2.630~2.738），大于风力作用为主的沙漠、黄土沉积物（2.122、1.930）。风力使戈壁形成“均质面”，空间变异程度为中等空间相关性（32.8%）：主导上风向裸露戈壁地表，沉积物以蠕移及风蚀残余组分为主（平均含量59.88%），分形维数均值为2.39；下风向半荒漠戈壁地表，沉积物以跃移组分为主（平均含量46.96%），分形维数均值分别为2.45、2.48，受主导风影响较弱的山间砂砾质地表，蠕移及风蚀残余组分含量较多（平均含量58.22%），分形维数均值为2.46。分形及其变异性指标可反映戈壁沉积物组分变化中的风沙作用过程。

关 键 词： 沉积物；分形维数；空间变异性；戈壁

文章编号：

分形是描述大自然中具有自相似特性物质的一种理论，分形维数是描述自然界中具有不规则几何外形、自相似性物质的一个有效参数[1-2]，可反映土壤风蚀、沙化程度[3-6]，在土壤学领域中常被用来描述沙漠及黄土地区的土壤结构特性[6,7-10]，其值与不同粒级土粒含量关系密切，随黏粒含量的增大而增大，随砂粒含量的增大而减小。亦有研究表明分形的空间变异性可指示区域土壤的差异性[11-15]，而能否通过分形的空间变异性来揭示戈壁地貌风沙作用过程及沉积物成因目前研究较少。

戈壁是干旱区或极端干旱区的一种主要的地表景观类型[16-17]。在我国西北地区广泛分布，面积达66.1×10^4 km^2[18]。原始冲-洪积物经长期的风沙作用被剥蚀、搬运、堆积，使戈壁地表物质逐渐粗粒化，形成“砾质面”。不同于沙漠沙的单峰态形式，该沉积物粒度组成在粒径分布曲线上常表现为多峰态[19-21]。在风沙作用过程中，由于沙粒分选搬运与沉积作用的影响，戈壁不同区域组分差异较大，且对分形维数值有显著影响[22]，因此沉积物分形维数在戈壁空间背景下变异性较大。研究表明，地统计学理论在土壤学领域可以描述土壤属性的空间特征，对生态修复、农业生产等具有指导意义，如研究土壤剖面水分空间变异性有助于了解深层水分分布状况及规律、不同土层土壤盐分的变异性研究则对了解区域土壤的盐渍化程度和状态、合理利用土壤资源方面有重要意义[23-24]。为此，探究沉积物分形特征及其空间变异性或许可以为揭示戈壁局地地貌发育过程中的风沙作用及沉积物成因提供研究方法。

苏宏图戈壁隶属内蒙古阿拉善盟左旗，该区域西南部、南部、东南部分别为架子山、乌力吉山、玛瑙山所阻挡，使之成为一个半闭合的盆地。区域内

收稿日期： 2019-06-28；　**修订日期：** 2020-01-29

基金项目： 国家自然科学基金项目(41861001)

作者简介： 刘茜雅（1995-），女，硕士，研究方向为水土保持与荒漠化防治. E-mail: imaulxy@163.com

通讯作者： 王海兵（1982-），男，副教授，研究方向为干旱区风沙灾害及防治. E-mail: hbwang@imau.edu.cn

有以山地为单元发育的干涸河流，强烈的风沙活动为该区提供了丰富的砂砾物质，形成裸露戈壁、有稀疏植被覆盖的半荒漠戈壁、山间砂砾质地表及沙丘等不同景观类型。苏宏图戈壁分布广泛、地形平坦、零星沙带覆盖其上，为研究沉积物分形空间变异性的一个理想区域。鉴于此，本文采集苏宏图戈壁盆地周边地表沉积物样品并计算了其分形维数值，分析了戈壁区沉积物分形特征、组分的空间变化对其分形空间变异性的影响，为揭示戈壁沉积物成因及戈壁地貌形成过程中的风沙作用影响提供研究方法。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区阿拉善盟左旗苏宏图（104°09′37.07″E，41°14′46.29″N），区域海拔高度范围在810~1200 m之间，区域中部为地势最低处，海拔为810 m。研究区属典型大陆性气候，全年干旱少雨，多年平均降雨量不足100 mm，年平均气温7.3 ℃；区域内主导风为西北风，年平均风速为2.1~4.7 $m\cdot s^{-1}$，最大风速为27.0 $m\cdot s^{-1}$，8级以上年平均大风日数40.1 d[25]。植被稀疏，主要分布的植物优势种为白刺，其他天然植被为红砂、梭梭、霸王等，采样点位置见图1。

研究区风沙活动频繁，在不同区域呈现不同的景观类型，其中西北部为裸露戈壁，东北部与西南部为有稀疏植被覆盖的半荒漠戈壁，东南部为山间砂砾质地表。戈壁景观如图2所示。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集与测定 在研究区西南方起每隔约2 km选取地势平坦、无人为干扰的自然裸露地表，将表层长×宽×深为20 cm×20 cm×2 cm沙粒混合均匀后采集沉积物样品共54个装入自封袋，其中西北部戈壁（采样点号28~50）、东北部戈壁（采样点号17~27、51~54）、西南部戈壁（采样点号1~10）、东南部山间砂砾质地表（采样点号11~16）。将沉积物样品进行编号、标记带回实验室处理，取回的样品经风干研磨后，称取全样200 g过筛。本研究按照美国制土壤分级标准，共划分21个粒径段，其中最小粒径段为0~0.05 mm，最大粒径段为16~32 mm。

1.2.2 分形维数值计算 由图解法可知，戈壁沉积物组分在土壤粒径频率分布曲线上呈显著的两段式分布，如下文图3b所示，其分形维数值采用公式(1)、(2)进行计算[22]。

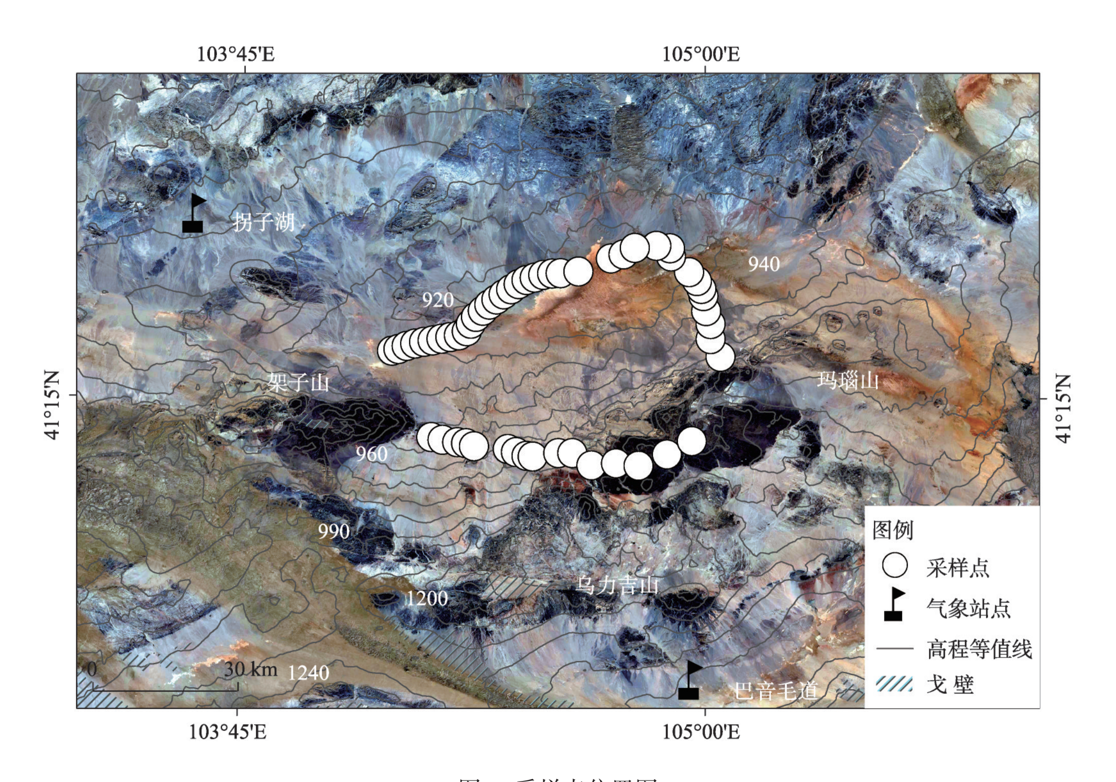


图1 采样点位置图

Fig. 1 Location of sampling sites

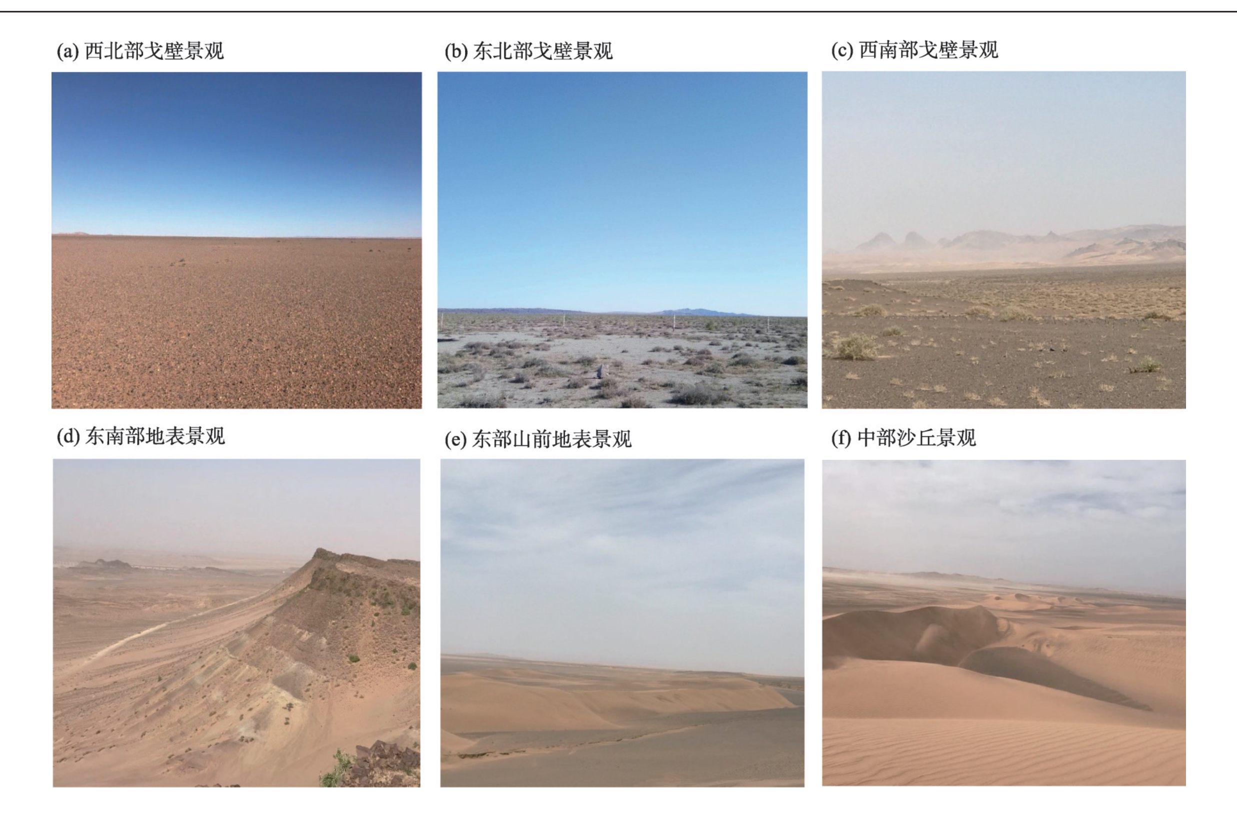


图2　区域景观

Fig. 2　Regional landscape

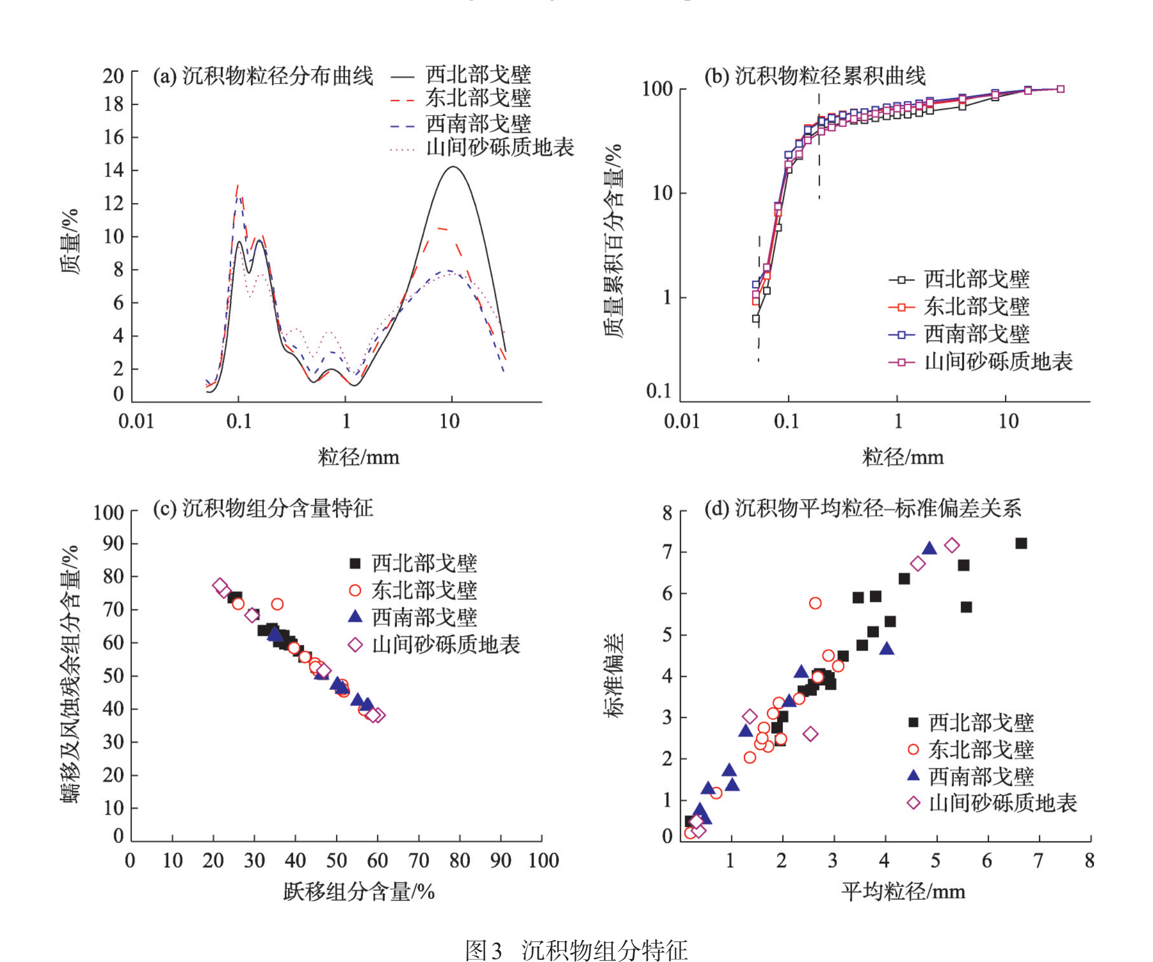


图3　沉积物组分特征

Fig. 3　Composition characteristic of sediments

$$D_i = 3 - \lg\left[\frac{w(\delta < \overline{d}_i)}{w_0}\right] \Big/ \lg\frac{\overline{d}_i}{\overline{d}_{max}} \quad (1)$$

$$D = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{D_1^2 + D_2^2 + \cdots + D_n^2}{\sum D_i}\right) \quad (2)$$

式中：D为土壤颗粒分形维数；D_i为每个粒径段的分形维数值；$\overline{d}_i$为相邻两筛分粒级d_i与d_{i+1}间土粒的平均直径（$d_i > d_{i+1}$，i=1，2，…n）；$\overline{d}_{max}$为最大粒级土粒的平均直径；w（$\delta < \overline{d}_i$）为土粒直径小于$\overline{d}_i$累计的重量；δ为码尺；w_0为全部粒级土粒的重量和；n为粒径段的总数，本文为2。

1.2.3 数据处理 文中数据采用Excel 2010进行汇总与计算，采用GS+9.0进行半方差函数计算以及理论模型的拟合。利用Origin 8.0和ArcGIS 10.2软件进行作图分析。

2 结果与分析

2.1 沉积物组分特征

戈壁沉积物粒径分布如图3a所示，沉积物粒度呈现多峰态的形式，第一个峰值在粒径为0.1 mm左右，第二个峰值在粒径为7.0 mm左右，同时在粒径0.1~1.0 mm间存在小峰区，表明戈壁地表物质组成具有复杂性，同时4个区域的峰值存在显著的差异性。基于吴正[26]的风沙动力学理论，不同组分沙粒的运动形式不同，戈壁沉积物中<0.050 mm的沙粒易发生悬移运动，0.050~0.179 mm的沙粒易发生跃移运动，0.179~20.919 mm的沙粒易发生蠕移运动或沉积，如图3b所示。4个区域沉积物中跃移组分和蠕移及风蚀残余组分的含量也显著不同，东北部戈壁与西南部戈壁跃移组分含量较多，平均含量分别为45.95%、47.97%，西北部戈壁与东南部山间地表则蠕移及风蚀残余组分含量较多，平均含量分别为59.88%、58.22%（图3c）。

戈壁地表沉积物的平均粒径与标准偏差呈显著的正相关性，表明戈壁不同区域形成的动力背景具有相似性[27]。平均粒径表示沉积物粒度的平均分布情况，西北部戈壁平均粒径均值为3.23 mm，东北部戈壁平均粒径均值为1.87 mm，西南部戈壁平均粒径均值为1.67 mm，东南部山间地表平均粒径均值为2.83 mm，由此可见4个区域的平均粒径差异较为显著，但均以砾组分为主。标准偏差表示沙粒分布的离散程度，西北部戈壁标准偏差为4.39，分选性极差；东北部戈壁标准偏差均值为2.95，分选性差；西南部戈壁标准偏差均值为2.51，分选性差；东南部山间地表标准偏差均值为4.00，分选性极差（图3d）。

不同戈壁区沉积物组分及粒度特征的差异体现了区域风沙作用下沉积物的差异。

2.2 沉积物分形特征及其与组分关系

如图4所示，本文计算的沉积物分形维数值介于2.30~2.64之间，该值随沉积物组分含量的变化表现出显著相关的变化特征。跃移组分含量与分形维数值呈现显著的正相关关系（R^2=0.730），分形维数值随跃移组分含量的增大而增大；蠕移及风蚀残余组分含量与分形维数值呈现显著的负相关关系（R^2=0.702），分形维数值随蠕移及风蚀残余组分含量的增大而减小；分形维数与含量较小的悬移组分无显著相关性（R^2=0.087）。戈壁沉积物平均粒径与分形维数之间存在不显著的负相关关系（R^2=0.439）。

2.3 沉积物组分与分形维数空间分布特征

戈壁沉积物组分与分形维数值的差异性在空间上的体现也极为明显（图5）。跃移组分在东北部、西南部戈壁分布最多；蠕移及风蚀残余组分在西北部戈壁分布最多，东南部山间地表次之，显然，各组分受地域的影响具有显著空间分布特征。分形维数主要与沉积物中跃移组分与蠕移及风蚀残余组分的含量密切相关，因而东北部与西南部戈壁的分形维数值较大，西北部戈壁的分形维数值较小，东南部山间地表的分形维数值较大。分形维数值的大小分布与其相关组分在空间上的分布特征吻合。

2.4 沉积物组分与分形维数的空间变异性分析

本研究通过对戈壁地表沉积物的3种组分（悬移组分<0.050 mm、跃移组分0.050~0.179 mm、蠕移及风蚀残余组分0.179~20.919 mm）的含量及分形维数进行半方差模型拟合，得到最佳模型及相关参数见表1，其中块金值（C_0）、基台值（C_0+C）、变程（A）是进行半方差分析的重要参数。其中，块金值反映最小抽样尺度下变量的变异性及测量误差，基台值表示系统内的总变异，当二者比值<25%时，研究系统表现为局部与整体的强空间相关性；该比值在25%~75%间时，局部与整体呈中等空间相关性；该比值>75%时，局部与整体相关性较弱[11]。由图6a~c及表

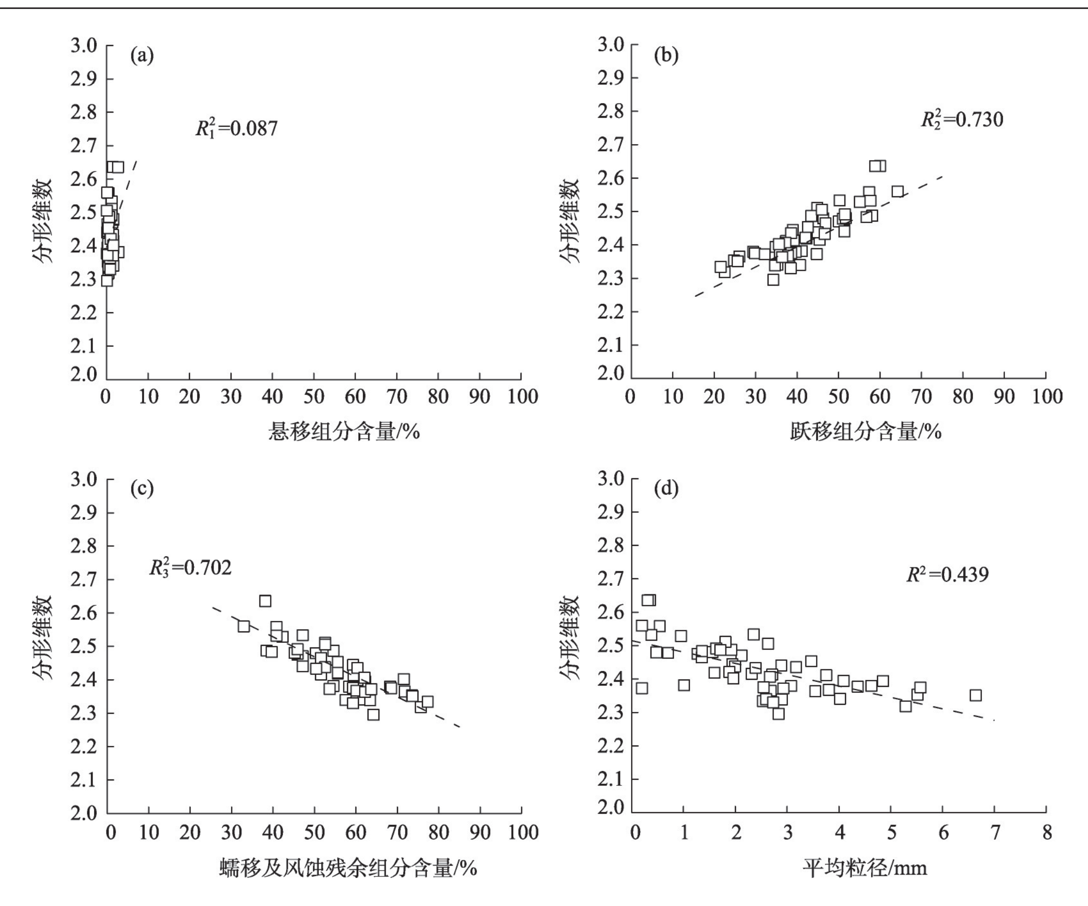


图4 组分含量与分形维数关系

Fig. 4 Relationship between components content and fractal dimensions

1可见,3种组分组分含量的最佳拟合模型均为球状模型,其块金值与基台值的比值依次为16.7%、30.6%、29.1%,分别表现为强空间相关性、中等空间相关性、中等空间相关性,表明其在指示区域动力背景时具有可靠性。分形维数值的最佳拟合模型为线性模型(图6d),其块金值较小,表明受测算误差引起的随机变异影响较小,其块金值与基台值的比值为32.8%,为中等空间相关性。变程表示变量在一定尺度上空间变异的范围,在该范围内,样本间距越小,空间相关性越大。戈壁沉积物主要组分的有效变程为0.26°,约为2.4 km,而分形维数的有效变程为0.43°,大约为3.9 km。总体上,沉积物中3种组分含量与分形维数值的决定系数均较大,能够在该研究尺度上反映不同区域的空间变异性。

3 讨 论

当风速达到起动风速时,地表沙粒开始运移[26]。Bagnold[28]研究认为沙粒运动的基本形式依风力、颗粒质量大小不同可分为悬移、跃移和表层蠕移。本研究认为戈壁沉积物组分亦可依据沙粒运动形式分为悬移组分(<0.050 mm)、跃移组分(0.050~0.179 mm)和蠕移及风蚀残余组分(0.179~20.919 mm)。前人研究计算的沙漠沙分形维数值为2.43~2.69[7]、黄土地区及山区不同土地利用方式影响下的土壤分形维数值常为2~3,且认为土壤中的黏、粉含量越多,分形维数值越大;砂粒含量越多,分形维数值越小[8-10,29-30]。本文计算的戈壁沉积物分形维数值介于2.30~2.64之间,其与沉积物跃移组分、蠕移及风蚀残余组分含量的大小显著相关,跃移组分含量越多,分形维数值越大;蠕移及风蚀残余组分含量越多,分形维数值越小,这与前人研究结果相一致。

不同动力机制作用对沉积物的分形维数值具有显著影响。暴雨期,泥石流沟道形成区松散的固体物质被强水力侵蚀作用搬运携带至堆积区形成泥石流沉积物,该物质粒径较粗,分形维数平均在2.630~2.738之间[31-32]。沙漠沙与黄土沉积物是长期风力作用塑造的结果,经过风力分选后,该沉积物粒径较小,分形维数值较小,分别为2.122、

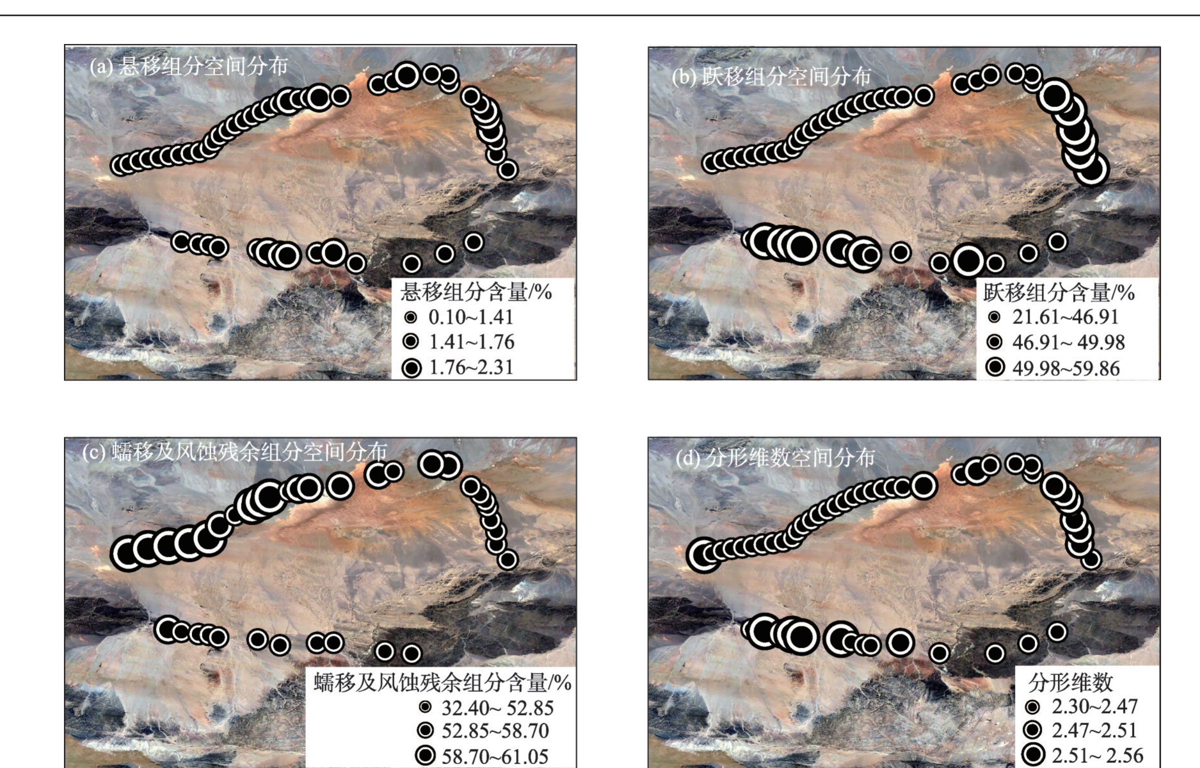


图5 沉积物组分含量及分形维数的区域差异

Fig. 5 Regional differences in the content of sediment components and fractal dimensions

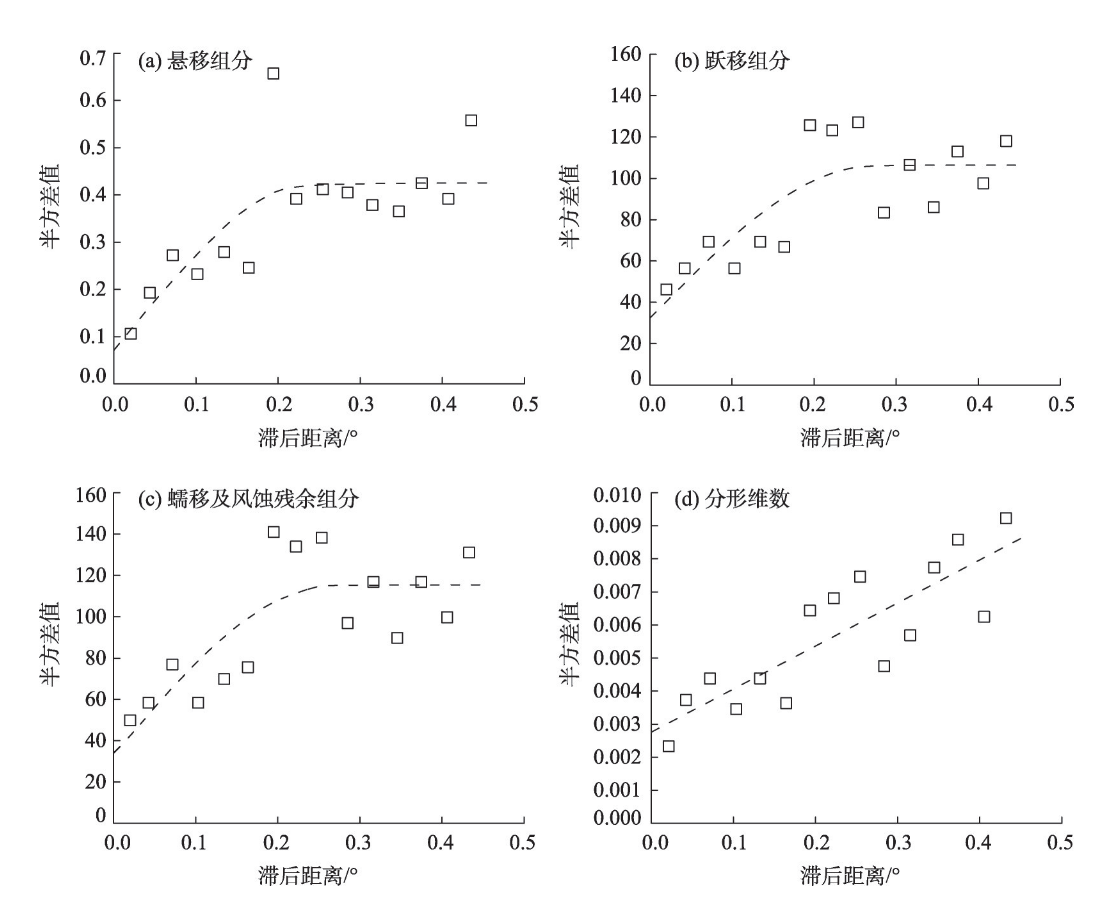


图6 沉积物组分含量及分形空间变异

Fig. 6 Spatial variation of sediment components and fractal dimensions

表1 沉积物组分与分形维数的变异函数理论模型及相关参数

Tab. 1 Theoretical model and related parameters of variation function of sediments composition and fractal dimensions

变量	理论模型	块金值(C_0)	基台值(C_0+C)	变程/°	块基比[C_0/(C_0+C)]/%	决定系数	残差
悬移组分含量/%	球状模型	0.071	0.426	0.243	16.7	0.577	0.116
跃移组分含量/%	球状模型	32.300	105.500	0.267	30.6	0.637	3927
蠕移及风蚀残余组分含量/%	球状模型	33.500	115.000	0.264	29.1	0.624	5153
分形维数	线性模型	0.002738	0.008359	0.434	32.8	0.714	1.70×10^{-5}

表2 不同类型沉积物分形维数的统计特征值

Tab. 2 Statistical eigenvalues of fractal dimensions of different types of sediments

研究对象	研究范围	样品个数	最小值	最大值	平均值	标准差
戈壁沉积物	苏宏图25 km^2范围内	54	2.300	2.640	2.430	0.077
泥石流沉积物	云南蒋家沟、浑水沟	8	2.600	2.900	2.738	0.111
泥石流沉积物	云南东川大凹子沟、多照沟，四川九龙娃娃沟、黄家沟等14条泥石流沟	14	2.450	2.770	2.630	0.100
沙漠沉积物	巴丹吉林沙漠、乌兰布和沙漠、临泽沙漠、腾格里沙漠	88	1.660	2.730	2.122	0.274
黄土沉积物	洛川马兰黄土和伊犁黄土	66	1.820	2.280	1.930	1.750

注：泥石流、黄土沉积物分形数据来自文献[31–33]，沙漠沉积物样品来自外业取样，分形维数来自实算数据。

1.930[33]（表2）。戈壁前期同时受风水两相侵蚀，为戈壁区积累了大量的物质基础。后期由于气候干旱，河流干涸，沙尘暴频发，使风力侵蚀成为塑造该地貌的主导因素。该类沉积物分形维数均值为2.43，高于风成沉积物、低于水成沉积物，在之后长期的风沙作用过程中使其在戈壁沉积环境下变异性较大。

中蒙边界的剥蚀丘陵经长期的风化剥蚀形成了大量的碎屑物质开始在山脚堆积，后经洪水搬运至较远的山麓地带，形成大面积的冲–洪积平原，为研究区戈壁提供了充足的物源。每到干燥多风季节，冲–洪积平原上的碎屑物质中<0.050 mm的悬移组分与0.050~0.179 mm的跃移组分颗粒被远距离输移释放，而在0.179~20.919 mm范围内的抗风蚀能力强的蠕移及风蚀残余组分颗粒就近沉积，使地表残留砾质覆盖体[34–35]，在主导上风向形成以风蚀作用为主的裸露戈壁，其沉积物分形维数值较小。在主导上风向地势较低的区域，地表沉积物在长期风沙流或沙尘暴作用下，悬移组分相互磨蚀碰撞与跃移组分远距离输移，加之植被阻滞，风能减弱，使在研究区东北部与西南部形成砂组分富积的戈壁地表。这些富含砂组分的地表在扬沙过程中不断为沙漠地表补充细粒组分，因此在研究区中部亦分布着零星沙带，沉积物分形维数值较大。受主导风影响较弱的东南部区域周边山体环绕，为该区积累了较多松散的粗粒物质，分形维数值偏大[22]。由此可见，分形维数空间分异的成因与主导风作用下的风沙地貌分布格局具有高度相关性。

综上可知，戈壁沉积物分形维数在空间上的变异性源于沉积物组分的变异性，但戈壁土壤并不是一种在所有标度范围内都具有自相似性的理想分形介质[36]，因此分形维数与组分具有部分自相似性，其变程较组分变程大。

4 结论

（1）苏宏图戈壁沉积物分形维数与组分关系显著。分形维数值随0.050~0.179 mm跃移组分含量的增大而增大（R^2=0.730），随0.179~20.919 mm蠕移及风蚀残余组分含量的增大而减小（R^2=0.702）。

（2）风力作用使戈壁形成“均质面”，沉积物中组分的分选、搬运、沉积使其分形在空间上具有分异性，变异程度为中等空间相关性（32.8%）。上风向区域受风蚀作用影响，沉积物中蠕移及风蚀残余组分含量较高（59.88%），分形维数均值为2.39；下

风向区域受风积作用影响，沉积物中跃移组分含量较高（46.96%），分形维数均值为2.47。

（3）利用土壤分形理论与地统计学相结合的方法可为揭示戈壁沉积物的成因机制及区域风沙作用提供一个新的研究思路，较传统粒度参数分析方法更为简便与直接。

参考文献（References）

[1] 伯努瓦·B·曼德布罗特. 大自然的分形几何学[M]. 上海: 上海远东出版社, 1998: 8−11. [Mandelbrodt Benoit B. Fractal geometry of nature[M]. Shanghai: Shanghai Far East Publishers, 1998: 8−11.]

[2] 李保国. 分形理论在土壤科学中的应用及其展望[J]. 土壤学进展, 1994, 22(1): 1−10. [Li Baoguo. Application and prospect of fractal theory in soil science[J]. Progress in Soil Science, 1994, 22(1): 1−10.]

[3] 朱晓华, 色布力马. 中国沙漠化土地类型的分形研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(1): 35−39. [Zhu Xiaohua, Se Bulima. Fractal analysis applied to fractal character of China desertification land[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(1): 35−39.]

[4] 董莉丽, 郑粉莉. 陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径分布分形特征[J]. 土壤, 2010, 42(2): 302−308. [Dong Lili, Zheng Fenli. Fractal characteristics of soil particle size distributions in gully-hilly regions of the Loess Plateau, north of Shaanxi, China[J]. Soils, 2010, 42(2): 302−308.]

[5] Hong L. Fractal dimension of soil particles under different plant communities in mountainous area[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 439(3): 032124, doi: 10.1088/1757-899X/439/3/032124.

[6] 徐建华, 艾南山, 金炯, 等. 沙漠化的分形特征研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(1): 6−10. [Xu Jianhua, Ai Nanshan, Jin Jiong, et al. Study on fractal characters of desert and desertification[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(1): 6−10.]

[7] 武生智, 马崇武, 苗天德. 沙粒级配和沙丘分布的分形分析[J]. 中国沙漠, 1999, 19(3): 50−53. [Wu Shengzhi, Ma Chongwu, Miao Tiande. Fractal analysis of sand-grading and dune distribution[J]. Journal of Desert Research, 1999, 19(3): 50−53.]

[8] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 71−74. [Su Yongzhong, Zhao Halin. Fractal features of soil particle size distribution in the desertification process of the farmland in Horqin Sandy Land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 71−74.]

[9] Ding W F. Fractal dimension features of soil aggregate distribution with the different reclamation years on Loess Plateau[J]. NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences, 2014, 6(5): 550−560.

[10] 姚姣转, 刘廷玺, 童新, 等. 科尔沁沙地沙丘-草甸相间地土壤颗粒的分形特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(2): 433−440. [Yao Jiaozhuan, Liu Tingxi, Tong Xin, et al. Soil particle fractal dimension in the dune-meadow ecotone of the Horqin Sandy Land [J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(2): 433−440.]

[11] 史舟, 李艳. 地统计学在土壤学中的应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 3−9. [Shi Zhou, Li Yan. Application of geostatistics in soil science[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2006: 3−9.]

[12] 贾晓红, 李新荣, 张景光, 等. 沙冬青灌丛地的土壤颗粒大小分形维数空间变异性分析[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 2827−2833. [Jia Xiaohong, Li Xinrong, Zhang Jingguang, et al. Spatial heterogeneity analysis of fractal dimension of soil particle for *Ammopiptanhus mongolicus* shrub[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 2827−2833.]

[13] Mohammadi M, Shabanpour M, MohamMadi M H, et al. Spatial variability of soil textural fractions and fractal parameters derived from particle size distributions[J]. Pedosphere, 2019, 29(2): 224−234.

[14] 马媛, 丁树文, 邓羽松, 等. 五华县崩岗洪积扇土壤分形特征及空间变异性研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 279−285. [Ma Yuan, Ding Shuwen, Deng Yusong, et al. Study of soil fractal dimension characteristic and spatial variability in collapsing alluvial fan of Wuhua County[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 279−285.]

[15] 冉啟香, 罗蔚, 张翔, 等. 分形在土壤空间变异性评价中的应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2010(7): 5−8. [Ran Qixiang, Luo Wei, Zhang Xiang, et al. Application of multifractality to evaluation of soil spatial variability[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(7): 5−8.]

[16] 中国黑戈壁地区生态本底科学考察队. 中国黑戈壁研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 4−5. [Scientific Team of Ecological Background in Black Gobi Area of China. A study on the Black Gobi in China[M]. Beijing: Science Press, 2014: 4−5.]

[17] 冯益明, 智长贵, 姚爱冬. 基于决策树的戈壁信息提取研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(1): 125−130. [Feng Yiming, Zhi Changgui, Yao Aidong. Gobi information extraction based on decision tree classification method[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(1): 125−130.]

[18] 殷代英, 屈建军, 赵素平, 等. 砾质戈壁在不同扰动方式下的风蚀量研究——以敦煌雅丹地质公园北边的砾质戈壁为例[J]. 干旱区地理, 2016, 39(3): 495−503. [Yin Daiying, Qu Jianjun, Zhao Suping, et al. Amount of wind erosion to gravel gobi under different disturbing modes[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(3): 495−503.]

[19] Li Y, Huang C M, Wang B L, et al. A unified expression for grain size distribution of soils[J]. Geoderma, 2017, 288: 105−119.

[20] Hossein B, Mostafa R, Mansouri Z M, et al. Particle size distribution models, their characteristics and fitting capability[J]. Journal of Hydrology, 2015, 529(3): 872−889.

[21] 董智, 王丽琴, 杨文斌, 等. 额济纳盆地戈壁沉积物粒度特征分

析[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(1): 32-38. [Dong Zhi. Wang Liqin, Yang Wenbin, et al. Grain size characteristics of gobi sediment in Ejina Basin[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(1): 32-38.]

[22] 刘茜雅, 王海兵, 左合君, 等. 砂砾质戈壁沉积物分形维数计算及其对风沙作用的指示意义[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(10): 125-130. [Liu Xiya, Wang Haibing, Zuo Hejun, et al. Calculation of fractal dimension of gobi sediments and its significance to the effect of wind-induced soil erosion accumulation[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(10): 125-130.]

[23] 乔江波, 朱元骏, 贾小旭, 等. 黄土高原关键带全剖面土壤水分空间变异性[J]. 水科学进展, 2017, 28(4): 515-522. [Qiao Jiangbo, Zhu Yuanjun, Jia Xiaoxu, et al. Spatial variability of soil water for the entire profile in the critical zone of the Loess Plateau[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(4): 515-522.]

[24] 刘继龙, 刘璐, 马孝义, 等. 不同尺度不同土层土壤盐分的空间变异性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(2): 305-312. [Liu Jilong, Liu Lu, Ma Xiaoyi, et al. spatial variability of soil salt in different soil layers at different scales[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(2): 305-312.]

[25] 刘陶, 杨小平, 董巨峰, 等. 巴丹吉林沙漠沙丘形态与风动力关系的初步研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1285-1291. [Liu Tao, Yang Xiaoping, Dong Jufeng, et al. A preliminary study of relation between megadune shape and wind regime in the Badain Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(6): 1285-1291.]

[26] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 31-33. [Wu Zheng. Wind-sand geomorphology and sand control engineering[M]. Beijing: Science Press, 2003: 31-33.]

[27] 吕志发. 粒度曲线和参数序列综合分析及其在环境分析中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 1990(2): 12-16, 71-72. [Lü Zhifa. The comprehensive sequence analysis of size curves and indices and their application in environmental analysis[J]. Coal Geology & Exploration, 1990(2): 12-16, 71-72.]

[28] Bagnold R A. The physics of sand and dunes[J]. Nature, 2009, 457: 1084.

[29] 杨婷, 景航, 姚旭, 等. 黄土丘陵不同土地利用方式下土壤颗粒组成及其分形维数特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 1-5, 24. [Yang Ting, Jing Hang, Yao Xu, et al. Soil particle composition and its fractal dimension characteristics of different land uses in Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(3): 1-5, 24.]

[30] Zhao S W, Jing Su, Yang Y H, et al. A fractal method of estimating soil structure changes under different vegetations on Ziwuling Mountains of the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Sciences in China, 2006, 5(7): 530-538.

[31] 倪化勇, 刘希林. 泥石流粒度分维值的初步研究[J]. 水土保持研究, 2006(1): 89-91. [Ni Huayong, Liu Xilin. A preliminary study on debris flow grain-size fractal dimension[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006(1): 89-91.]

[32] 黄祺, 陈宁生, 朱云华, 等. 泥石流源区砾石土的粒度分形特征[J]. 山地学报, 2012, 30(5): 578-584. [Huang Qi, Chen Ningsheng, Zhu Yunhua, et al. A preliminary study on debris flow grain-size fractal dimension[J]. Mountain Research, 2012, 30(5): 578-584.]

[33] 陈冬梅, 穆桂金. 不同沉积环境下沉积物的粒度分形特征的对比研究[J]. 干旱区地理, 2004, 27(1): 47-51. [Chen Dongmei, Mu Guijin. Comparising study of grain-size fractal dimensions characteristics between several sediments with different forming environments[J]. Arid Land Geography, 2004, 27(1): 47-51.]

[34] 熊鑫, 王海兵, 肖建华, 等. 戈壁沙砾质地表沉积物全粒径分布模式及其对分选作用的指示意义[J]. 中国沙漠, 2019, 39(2): 202-208. [Xiong Xin, Wang Haibing, Xiao Jianhua, et al. Particle size distribution models of gobi sediments and its significance to the effect of sorting[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(2): 202-208.]

[35] Wang H B, Jia X P, Li Y S, et al. Horizontal wind erosion flux and potential dust emission in arid and semiarid regions of China: A major source area for East Asia dust storms[J]. Catena, 2015(133): 373-384.

[36] 龚元石, 廖超子, 李保国. 土壤含水量和容重的空间变异及其分形特征[J]. 土壤学报, 1998(1): 10-15. [Gong Yuanshi, Liao Chaozi, Li Baoguo. Spatial variability and fractal dimension for soil water content and bulk density[J]. Acta Pedologica Sinica, 1998(1): 10-15.]

Fractal spatial variability and its genesis of sediments in Suhongtu Gobi

LIU Xiya[1,2], WANG Haibing[1,2], ZUO Hejun[1,2], XIAO Jianhua[3]

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, Inner Mongolia, China; 2. Key Laboratory of Aeolian Sand Control Engineering in Inner Mongolia, Hohhot 010011, Inner Mongolia, China; 3. Northwest Institute of Ecology and Environmental Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: In the Gobi Desert, the composition structure of its sediments have fractal characteristics. These fractal characteristics and their variability to indicate sand's role in the formation of surface sediments have not been well understood. In this study, we calculated the fractal dimension of surface sediments in the Suhongtu Gobi Desert, Alxa League, Inner Mongolia, China and analyzed its spatial variability. The results showed that the fractal dimensions of sediments increase with the increase of jumping components' content (0.050−0.179 mm) and then decrease with the increase of creepping and wind erosion residual components' content (0.179−20.919 mm). In the Gobi Desert, the wind is the dominant factor in shaping the landscape. Gobi sediments' fractal values are smaller than those of alluvial and alluvial debris flow sediments (2.630–2.738) and larger than those of desert and loess sediments with dominant wind force (2.122 and 1.930, respectively). The wind force makes the Gobi Desert form a "homogeneous surface" with a spatial variability of moderate spatial correlation (32.8%). The dominant wind direction is exposed to the Gobi surface. The sediments are mainly composed of vermicular and wind erosion residual components (average content of 59.88%), and the mean fractal dimension is 2.39. When there is lower wind toward the semi-desert Gobi surface, the sediments are dominated by jump components (average content of 46.96%), with fractal dimension mean values of 2.45 and 2.48, respectively. Furthermore, with weak influence by the dominant wind, the sandy gravel surface between mountains has more vermicular and wind erosion residual components (average content of 58.22%), with a fractal dimension mean value of 2.46. Hence, fractal and variability indices can reflect the sand's role in changing the Gobi sediments' composition.

Key words: sediments; fractal dimension; spatial variability; Gobi